

¿Qué nos dicen los sensores sobre los cultivos?

Los sensores de cultivo proporcionan a los agricultores mediciones rápidas, objetivas, cuantitativas y precisas (repetibles), difíciles o imposibles de obtener por otros medios. Estos datos, generalmente adquiridos durante la primera fase del ciclo de la Agricultura de Precisión (véase el primer ciclo de Precision Ag Corner en nuestra edición de noviembre 2016), necesitan convertirse en información (2ª etapa) para ayudar a los agricultores a tomar decisiones óptimas de manejo (3ª etapa).

Como bien saben nuestros lectores, New Ag International se ha asociado con el Grupo de Investigación de AgroICT y Agricultura de Precisión (GRAP) del Centro Agrotécnico de la Universidad de Lérida en Cataluña, España.

En cada número de la revista, José A. Martínez-Casasnovas, Jaime Arnó y Alexandre Escolà, junto a nuestro equipo, han confeccionado una editorial cuyo objetivo es ayudar a las distintas partes interesadas a acortar la brecha entre uso de datos en la economía ("datanomics") y la agricultura comercial. En el anterior artículo de Precision AG Corner de septiembre, tratamos los aspectos generales relacionados con el monitoreo por sensores. En esta edición, revisaremos algunas de las técnicas de monitoreo por sensores más relevantes, remotas o de proximidad, que se utilizan para recopilar información sobre el cultivo.

En el Rincón de Agricultura de Precisión (Precision AG Corner (PA)) de septiembre, describimos la base de las técnicas de monitoreo por sensores y revisamos algunos sensores de suelos y de rendimiento. Sin embargo, uno de los aspectos clave en la agricultura de precisión (AP) es el uso de sensores para proporcionarles a los agricultores y sus asesores datos confiables sobre sus cultivos. ¿Cuáles son los sensores más utilizados en la agricultura de precisión bajo plataformas remotas o de proximidad? Aunque en general se reconoce que el punto de partida de la agricultura de precisión fueron los planos de rendimiento (obtenidos a través del monitoreo por sensores de proximidad), también es cierto que su implementación ha sido posible gracias a la disponibilidad de datos obtenidos mediante el monitoreo por sensores remotos.

EL MONITOREO POR SENSORES REMOTOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN SE UTILIZA PRINCIPALMENTE PARA CALCULAR ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Nadie puede negar que el monitoreo por sensores remotos es la forma de adquirir información sobre objetos, coberturas del suelo u otros fenómenos sin tener contacto físico con ellos. Aunque esta obtención de datos también se puede hacer con algunos sensores de proximidad (por ejemplo, cámaras fotográficas), el término monitoreo por sensores se refiere generalmente al uso de sensores ubicados en satélites, aeronaves o vehículos aéreos no tripulados (VANT, drones). Desde los inicios del monitoreo por sensores remotos (o teledetección) digitales multi-espectrales, allá por 1972, con el lanzamiento del Landsat 1 (NASA),

se han utilizado imágenes satelitales para el monitoreo agrícola, en el mapeo del estado de los cultivos, en el cálculo de las necesidades hídricas, y en la clasificación de cultivos, entre otros. Sin embargo, no fue hasta el año 2000, que las primeras imágenes públicas de alta resolución (1-4 m) estuvieron disponibles con el lanzamiento de IKONOS. Después, aparecieron otros satélites capaces de tomar imágenes con una resolución aún más alta, lo que permitió su completa aplicación en la agricultura de precisión (por ejemplo, Quickbird-2, WorldView-2,3, etc.). Hoy en día, los avances tecnológicos nos han permitido la miniaturización de este tipo de sensores, capaces de adquirir imágenes de hasta 2-3 cm/

pixel (cuando se encuentran en un vehículo aéreo no tripulado (VANT)), lo que amplía la gama de aplicaciones en la agricultura y en otras disciplinas. En la agricultura de precisión, los sensores remotos se utilizan principalmente en el monitoreo detallado de los cultivos a través de los denominados índices de vegetación (VI, en inglés). El VI más conocido es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, en inglés), que es un cálculo sencillo que utiliza la reflectancia de la vegetación en las bandas rojas (R) e infrarrojas cercanas (NIR) del espectro electromagnético: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$. Las plantas sanas absorben la luz roja para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis y principalmente reflejan

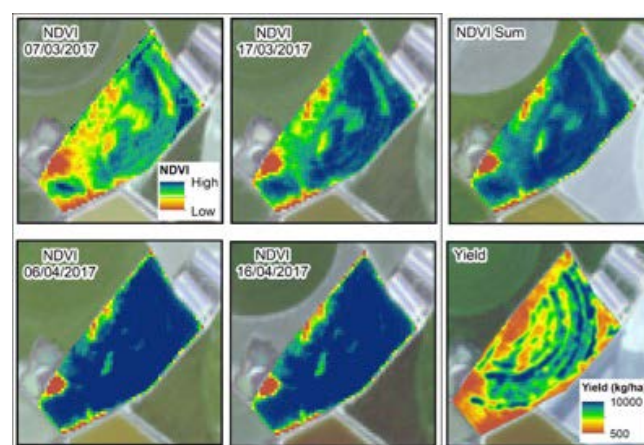
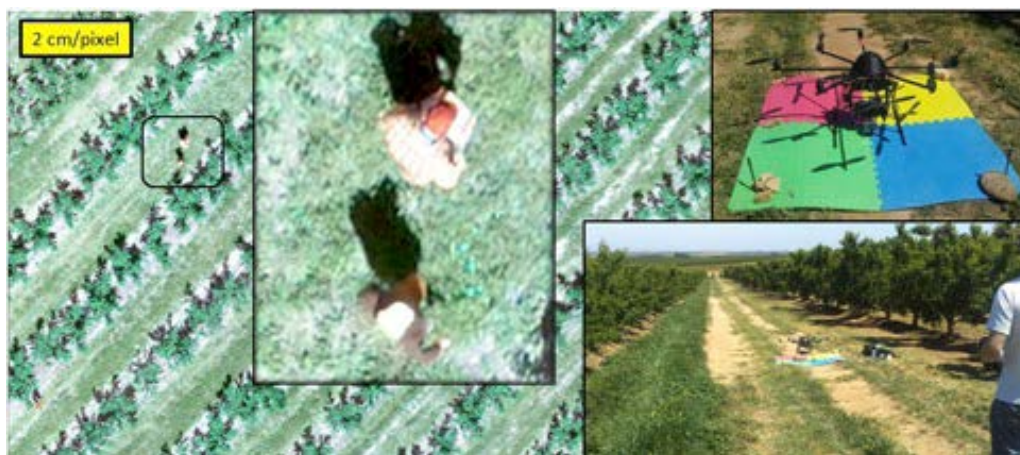


Imagen 1: Índice de Vegetación (NDVI) de un campo de cebada (15 ha) mapeado durante el invierno, en distintas fechas, utilizando imágenes Sentinel-2A. El NDVI Sum (suma) muestra la suma de los índices de vegetación durante la primavera y la imagen Yield (rendimiento) corresponde al rendimiento final mapeado a partir de los datos obtenidos con un monitor de rendimiento. El NDVI Sum representa la productividad potencial relativa de cada zona del campo. La variabilidad espacial del rendimiento se ajusta mejor a la etapa del cultivo antes de la floración (índice de floración de marzo) que, a los otros índices de floración de etapas posteriores, cuando el NDVI está saturado debido a la gran absorción de luz roja.

Imagen 2: Ejemplo de imagen tomada con un VANT cuya resolución es de 2 cm/píxeles. La imagen muestra al octocóptero que se usó para tomar la imagen y el nivel de detalle (que permite ver a dos personas tomando muestras en el huerto durante el vuelo).



la luz NIR. Por lo tanto, cuanto más saludable sea la planta, mayor absorción de luz roja (menos reflectancia), mayor reflectancia NIR y, por lo tanto, mayor reflectancia NDVI. En cambio, una planta afectada por una enfermedad, una plaga o estrés hídrico tiende a reflejar más luz roja y menos luz NIR, disminuyendo el valor de NDVI. Dado que actualmente hay un gran número de plataformas y sensores, existen cientos de posibles combinaciones de bandas para calcular los VI. Entonces los científicos tienen que establecer la relación entre estos índices y las características fisiológicas de las plantas.

Los índices de vegetación que se obtienen de los sensores remotos se pueden utilizar en la agricultura de precisión de muchas maneras y en diferentes momentos del ciclo del cultivo. Antes de comenzar la temporada, y basándose en datos de temporadas anteriores, los índices de vegetación (VI) se pueden utilizar para definir unidades de manejo específico del campo en operaciones como la diferenciación de: siembra (en cultivos de grano), fertilización, correcciones con materia orgánica (ej. compost) y riego, entre otros. Para tales propósitos, sería mejor no tomar decisiones basándose sólo en el índice de vegetación de una fecha específica, sino en la integración de otras posibles imágenes anteriores que muestren la variabilidad del vigor de la vegetación del o de los campos objetivo. Esto dará una visión más realista del potencial productivo de las diferentes zonas del campo (Imagen 1). Además, y de preferencia, los mapas de conductividad eléctrica aparente y los mapas de rendimiento anteriores (si están disponibles) deberían utilizarse también y en combinación con los índices de vegetación para definir las diferentes unidades de manejo específico del campo. Sin embargo,



Imagen 3: Diferentes sensores radiométricos comerciales utilizados para el cálculo continuo del vigor del cultivo y la fertilización a tasa variable.

muchas veces los agricultores no contarán con estos datos y tendrán que depender sólo de las imágenes aéreas multispectrales y de los índices de vegetación. ¿Qué pasa si no tenemos una serie de imágenes para calcular el potencial productivo de los índices de vegetación? En muchos casos, los agricultores sólo podrán permitirse costear una o dos imágenes para mapear el vigor de los cultivos. En esos casos, lo mejor es adquirir imágenes justo antes de la época de floración (ej. en los cultivos de grano) (Figura 1) o al principio de la maduración (ej. en las vides). En otras etapas, los cultivos (tal vez) no han alcanzado su máxima expresión vegetativa, o ya está disminuyendo. Durante la floración (ej. maíz), el color de las flores puede interferir con el verdor de la vegetación y podría alterar la respuesta espectral de las bandas utilizadas para calcular los índices de vegetación, por lo que se prefieren las imágenes que están entre el momento en que el cultivo cubre totalmente el suelo y el de la floración.

Durante la temporada, los índices de vegetación sirven principalmente para monitorear el estado del cultivo y decidir sobre cuáles serán las acciones de manejo a seguir. Estas acciones pueden ser diversas. Terminado el ciclo del cultivo (ej. cultivos de cereales), una de las primeras acciones a realizar es la aplicación de una fertilización lateral, principalmente de nitrógeno (N). Las imágenes aéreas son de gran interés para la fertilización diferencial directa, puesto que el N es uno de los costos principales en la producción de cultivos. Para este propósito, el momento en que se obtiene la ima-

gen es importante (véase también la Figura 1). Por ejemplo, en el caso del maíz, el momento adecuado de obtención de imágenes para decidir sobre la fertilización lateral diferencial es V6 (seis hojas). En ese momento el cultivo no cubre totalmente el suelo y todavía es posible entrar en el campo para aplicar el fertilizante. Después de la fertilización lateral, también es importante el monitoreo del cultivo, especialmente en cultivos de regadío. No sólo se trata de detectar el estrés hídrico y decidir el momento del riego, sino que los índices de vegetación también pueden ser muy útiles para detectar problemas de riego como el fallo de aspersores, diferencia de presión de agua en los pivotes, fallo de las boquillas de aspersión, etc. Como complemento, el monitoreo a través de los índices de vegetación puede retroalimentar al agricultor al darle información sobre cómo está rindiendo el cultivo y acerca de las consecuencias del manejo operacional.

Otro tema importante para los agricultores es predecir el rendimiento antes de la cosecha. Algunos índices de vegetación están interrelacionados con el rendimiento algunas semanas antes de la cosecha, sin los inconvenientes de los sensores en terreno, o sin la necesidad de esperar hasta el final de la temporada para obtener el mapa del rendimiento, ya sea para organizar la logística o para hacer una estimación de los ingresos esperados. En las vides, diferentes estudios han demostrado que los índices de vegetación derivados de imágenes multispectrales tomadas ± 15 días desde el inicio de la maduración de la uva (aproximadamente a un mes o más de la vendimia)



Creado en 2004, FORCE-A comenzó desarrollando y fabricando sensores de fluorescencia para el mundo universitario y de la investigación y desarrollo (I+D). Luego, se decidió ampliar la actividad a la toma de decisiones, en particular en el área vitivinícola. J.L. Ayrál y Z. G. Cerovic son los fundadores de esta empresa. J.L. Ayrál actúa como el Gerente de Operaciones y Lionel Breton como el Presidente.

Hay muchos sensores de cultivo en el mercado, pero ¿cuál cree usted que es el verdadero uso en la investigación y en los campos productivos? ¿Es lo suficientemente amplio? Si no, ¿cuáles pueden ser las razones?

La pregunta real no es la cantidad de sensores que hay, sino la información que estos entregan. En las dos actividades en que opera FORCE-A, la empresa tiene como objetivo proporcionar información adecuada a los usuarios. En investigación, la versatilidad de DUALEX y MULTIPLEX permite a los investigadores desarrollar su propio modelo en línea con sus proyectos. En la toma de decisiones del área vitivinícola, que es un mundo muy complejo, el propósito es obtener la información (sensor) y utilizar esta información con el fin de entregar una recomendación y no sólo una caracterización.

Entrevista a Lionel Breton, CEO, FORCE-A

¿Cuáles son las tendencias en el monitoreo por sensores en los cultivos y qué ofrecen los sensores Force-A?

Básicamente, podríamos decir que se requieren tres elementos clave: mejor rendimiento, prevención de enfermedades y manejo de los insumos. FORCE-A con sus herramientas DUALEX y MULTIPLEX, ofrece la posibilidad de "detectar" las señales relacionadas con estos temas.

Además de los sensores, ustedes también ofrecen servicios relacionados con la toma de decisiones para las operaciones de gestión. ¿Cuáles son las razones de esta ampliación en la cartera?

Es obvio que cuando usted es un fabricante de sensores debe avanzar hacia la creación de herramientas para la toma de decisiones. Si observamos la industria vitivinícola internacional, existe una tendencia mundial hacia una mejor calidad. La agricultura de precisión es una respuesta clara al "mejoramiento de la calidad".

Un grupo focalizado (focus group) de la Comisión Europea señaló que la Agricultura de Precisión (AP) implica normalmente altos costos iniciales con un retorno de la inversión a largo plazo. Los sensores de AP, ¿son "demasiado caros"? ¿Existen estudios independientes confiables sobre costo-beneficio que analicen la real contribución de la implementación de la agricultura de precisión?

En cuanto a las nuevas tecnologías, hay diferentes fases. La fase 1, podemos llamarla "nativa", es obviamente costosa en términos de desarrollo, investigación y aplicación. Pero cuando la tecnología demuestra que responde a una necesidad real del mercado, digamos que en la fase 2, surge el ahorro de costos a través del uso extensivo de la tecnología y trae también beneficios para el usuario.

Tenemos en FORCE-A una clara evidencia de este proceso.

Sus herramientas de fluorescencia, ¿están calibradas para la detección temprana de la carencia de nutrientes, en particular las deficiencias de micronutrientes que a menudo se ocultan en las primeras etapas?

En las aplicaciones de administración de nutrientes, nuestras herramientas se dedican a la distribución del nitrógeno, donde varias publicaciones han demostrado nuestra capacidad para evaluar las deficiencias en las etapas tempranas (por ejemplo, Multiplex en el maíz).

"En las aplicaciones de administración de nutrientes, nuestras herramientas se dedican a la distribución del nitrógeno, donde varias publicaciones han demostrado nuestra capacidad para evaluar las deficiencias en las etapas tempranas (por ejemplo, Multiplex en el maíz)".

Más del 20% de la superficie cultivada de trigo en Francia recibe información para la toma de decisiones de los servicios para la tercera aplicación de nitrógeno, principalmente a partir de imágenes satelitales y drones. ¿Cómo se diferencian las soluciones de Force A de los servicios integrados listos para su uso como lo son los mapas de aplicación de tasa variable?

Una de las principales características de los productos FORCE-A es la tecnología no destructiva de proximidad. Esto lo entienden muy bien nuestros clientes y hemos desarrollado para ellos índices patentados

como el Índice de Balance de Nitrógeno (NBI).

Ustedes han establecido una serie de asociaciones en todo el mundo, principalmente con instituciones de investigación. Muy pocos con la industria de insumos. Sin embargo, una de ellas es notable, que es la asociación con la empresa francesa de bioestimulantes Goemar.

¿Cuál es la naturaleza de dicha asociación?

Hemos establecido asociaciones con universidades/investigadores del área de investigación y desarrollo (I+D) y con socios industriales; en este segundo caso, especialmente en el mundo vitivinícola. Estamos operando a nivel mundial en investigación con acuerdos con distribuidores exclusivos desde EE. UU. hasta China, desde Brasil hasta la India y tenemos muchos acuerdos con los viticultores de los principales países vitivinícolas con el fin de ofrecer una recomendación personalizada en profundidad; no hay dos vinos equivalentes.

¿Cuáles son los principales desafíos en sensores de cultivos para la agricultura de precisión en los próximos años? ¿Cómo se posiciona Force-A para abordar dichos desafíos? ¿Dónde ve usted el crecimiento más importante del mercado para sus productos y servicios?

Como mencionaba antes, tenemos tres objetivos clave: cantidad (rendimiento), perennidad del cultivo (detección de enfermedades) y seguridad (gestión de insumos). Nosotros en FORCE-A nos preparamos para responder a los desafíos que se podrían resumir en: alimentar a un número creciente de personas, proteger el suministro de la materia prima, y respetar el medio ambiente.

son útiles para predecir el rendimiento de la uva (véase Precision AG Corner de junio de 2017, pág. 13). Esta predicción puede mejorar si se tienen en cuenta, además de los índices de vegetación, otras variables de carga de vid muestreadas durante la temporada en las vides de referencia (p. ej. número de ramas, número de racimos). Algunos trabajos de investigación han tratado de ir aún más lejos, intentando demostrar que no sólo se puede predecir el rendimiento de las uvas a partir de los índices de vegetación, sino también el de la calidad de éstas y la calidad del vino procedente de determinados viñedos seleccionados en base a los índices de vegetación. En este sentido, los estudios demuestran que las variables de cultivo relacionadas con el desarrollo vegetativo tienen una mayor correlación con los índices de vegetación, pero no todas las variables de calidad de la uva están bien relacionadas entre sí. Por ejemplo, la probable graduación alcohólica o la acidez total del jugo de uva no suelen presentar una clara diferenciación en las zonas de índices de vegetación, o a veces dependen de la variedad. Otras propiedades como los fenoles totales, los colorantes, las antocianos o los taninos presentan un mejor comportamiento en relación con las zonas de índices de vegetación. En esos casos las relaciones son inversas, lo que indica que las zonas de bajo vigor son las que presentan los contenidos más altos de fenoles y los valores más altos de unidades de absorción del color, de antocianos y taninos en el jugo de uva; y siempre la diferenciación de esas propiedades están más presentes en las zonas de 2 de índices de vegetación que en las zonas de 3 índices de vegetación. Aunque los índices de vegetación pueden ser muy útiles para monitorear la variabilidad espacial, antes de tomar decisiones sobre manejo diferenciado, será importante entender si existen suficientes variaciones espaciales estructuradas de vigor. De este modo, el agricultor/técnico podrá ver si las áreas de manejo específicas del terreno son lo suficientemente grandes como para justificar la inversión en equipamiento y dispositivos para el manejo diferenciado. Como se

puede ver, el monitoreo por sensores remotos (o teledetección) ha jugado y está jugando una función importante en la agricultura de precisión y aún tiene mucho que decir. Coincidiendo con el auge de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también hay una revolución en el desarrollo de nuevos satélites y sensores. El lanzamiento de nuevas misiones satelitales con cargas útiles mejoradas y la aparición de nano satélites, que aumentan las resoluciones espaciales y temporales de las series de imágenes, abren nuevas posibilidades. Por ejemplo, hay empresas (ej. Planet) que intentan entregar una cobertura diaria del mundo con un detalle de 3-4 m/pixel. Para ello habrá una constelación de

120 satélites capaces de capturar 150.000.000 km²/día en las bandas espectrales RGB y NIR. Además de estas iniciativas privadas hay aportes de la administración pública, como lo es, por ejemplo, la misión Sentinel-2 de la Comisión Europea. Esta misión proporciona imágenes gratuitas actualizadas aproximadamente cada 5 días y con una resolución de 10/20 píxeles (visite <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> para más detalles). Aunque la resolución de 10 m puede ser una limitación para los objetivos de la agricultura de precisión en los campos pequeños, sus aplicaciones pueden ser útiles en cultivos extensivos o en la horticultura en grandes terrenos. A pesar de estos

sensores remotos o teledetección. Se espera que lleguen nuevas aplicaciones en un futuro próximo y no se debe descartar ninguna plataforma o sensor.

EL MONITOREO CON SENSORES DE PROXIMIDAD AYUDA A EVALUAR EL VIGOR DEL CULTIVO

El monitoreo de cultivos con sensores de proximidad ha evolucionado rápidamente en los últimos años y muchos sensores y técnicas de monitoreo con sensores se comercializan o están en sus últimas etapas de desarrollo. Entre las técnicas disponibles, hay aplicaciones que se basan en visión artificial, radiometría, ultrasonidos, LiDAR y muchos otros principios de

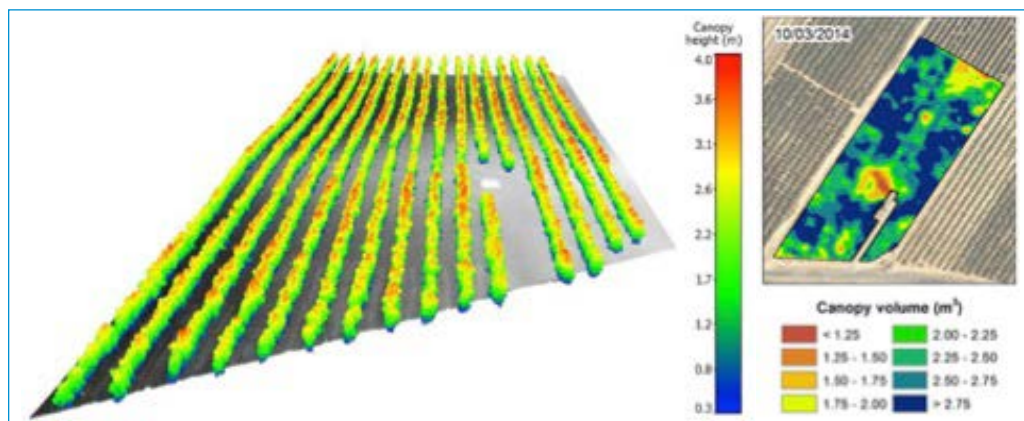


Imagen 4: Nube de puntos 3D (izquierda) y mapa del volumen del follaje (derecha) de 1 ha de huerto de olivos. Imagen adaptada del trabajo de investigación publicado por Escolà et al en Agricultura de Precisión (2017) 18:111-132.

avances, las aeronaves y los VANT o drones siguen quedándose con una parte de la torta. Si se disminuye la altitud de los sensores se reduce la necesidad de hacer correcciones atmosféricas y aumenta la resolución espacial de imágenes (Imagen 2). Lo último es muy importante cuando se trabaja con cultivos en hileras como viñedos o frutales. Esto permite eliminar los píxeles de tierra para que sólo funcionen con datos de cultivos puros. Además, estas imágenes de tan alta resolución espacial también podrían utilizarse para detectar zonas con maleza dentro de los campos y obtener mapas de prescripción para controlar estas zonas de malezas con un enfoque de dosis variable específica para el terreno.

En conclusión, hoy en día los agricultores y técnicos tienen un gran número de posibilidades para monitorear sus cultivos y decidir sobre la gestión diferencial basada en imágenes de

monitoreo por sensores. Tal es el caso de los sensores radiométricos terrestres diseñados para calcular el vigor vegetativo del cultivo y relacionarlo con el contenido de N o las necesidades de N. La Imagen 3 muestra varios sensores comerciales utilizados para el cálculo continuo del vigor vegetativo de la planta para aplicaciones de dosis variables de N en los cultivos de granos.

En horticultura, los cultivos suelen formarse en modelos tridimensionales. Esto hace que sea muy importante no sólo monitorear los cultivos desde arriba mediante soluciones de monitoreo por sensores aéreos de forma remota, sino también a lo largo de sus zonas laterales. Además, la medición de los frutos para determinar las características geométricas y de calidad de los cultivos frutales puede proporcionar a los agricultores información importante sobre su producto final. Se utiliza, por ejemplo, la visión artificial

para detectar y contar los frutos en el huerto para la estimación de la carga del cultivo. Los sensores radiométricos se pueden utilizar para medir el vigor vegetativo y para detectar enfermedades en los huertos de frutales. Es interesante el uso de sensores radiométricos térmicos para detectar el nivel del agua y las necesidades de riego.

Hoy en día, todavía se siguen desarrollando otros tipos de sensores y técnicas de detección. Tal es el caso de los sensores LiDAR (por su sigla en inglés, Detección y Alcance de Luz) para obtener información sobre el follaje de cultivos herbáceos y de cultivos arbóreos. Este tipo de sensores se utiliza por vía aérea en la silvicultura desde hace varios años en lo que se conoce como escáneres láser aerotransportados (ALS, en inglés). Sin embargo, debido a sus costos reducidos y a los mejoramientos tecnológicos -los escáneres láser terrestres (TLS), cuando se encuentran estacionarios, o los escáneres láser terrestres portátiles (MTLS)- se han convertido en una buena alternativa en suelo para la agricultura. En pocas palabras, los sensores LiDAR utilizan la luz láser para detectar objetos y calcular su distancia. Normalmente, este tipo de sensores proporciona medidas de distancia 2D o 3D con la ayuda de espejos giratorios que dirigen el rayo láser hacia diferentes ángulos alrededor del sensor. Lo que produce el sensor es generalmente una matriz polar (polar array) entregando rangos y

ángulos para cada medición. Cuando se utiliza junto con un receptor GNSS, la posición de la antena portátil se transfiere al sensor y a cada una de las mediciones resultantes en una nube de puntos 3D del área escaneada (Imagen 4, izquierda). Al escanear un huerto con un MTLS, se puede extraer información sobre la altura, ancho y volumen del follaje de los árboles y presentársela al agricultor mediante un mapa de variabilidad espacial de cada uno de los parámetros (Imagen 4, derecha). Además, también se puede obtener información sobre el índice de área foliar, la porosidad del follaje y otras propiedades geométricas y estructurales. Asimismo, el escaneo de campos o huertos varias veces durante la temporada proporciona la evolución temporal del cultivo. Por ejemplo, al restar los mapas del volumen del follaje de diferentes fechas, el resultado es un mapa de crecimiento entre las dos fechas.

Al igual que otras técnicas de monitoreo por sensores, la información que se entrega no es un diagnóstico de lo que está sucediendo en el campo, sino una imagen general de su variabilidad. Luego, le corresponde al agricultor o a su asesor determinar qué es lo que está sucediendo en el campo y decidir la mejor estrategia de manejo. Este tipo de sistemas y técnicas ya se utilizan en la industria, pero aún están en fase de desarrollo en la agricultura.

MONITOREO POR SENSORES DE FLUORESCENCIA: LA LUZ QUE "EXCITA" A LAS PLANTAS

Aparte de la reflectancia visible e infrarroja, la concentración de clorofila de las hojas o el funcionamiento de la fotosíntesis como proceso global pueden ser detectados por la luz fluorescente. Ahora bien, la luz no se refleja simplemente, sino que es emitida a una longitud de onda mayor que la que es absorbida inicialmente, lo que excita a las plantas a la fluorescencia. Por lo tanto, la fluorescencia entre los rangos azul y verde extiende las longitudes de onda desde aproximadamente 400 a 600 nm. Otro rango común para la fluorescencia de plantas es el rojo (650 nm) a la región roja lejana (770 nm). Debido a que la clorofila y la fotosíntesis están normalmente implicadas en este flujo de radiación (desde la excitación hasta la fluorescencia emitida), las señales detectadas por los sensores de fluorescencia pueden interpretarse en términos de contenido de clorofila y actividad de fotosíntesis. Específicamente, las hojas con menos actividad fotoquímica (con menor contenido de clorofila) aumentan la fluorescencia en comparación con las hojas sanas con mayor absorción de luz. El razonamiento es sencillo. Las plantas con baja clorofila, que producto de haber sido afectadas por un déficit de agua, o por el suplemento incorrecto de nutrientes minerales, o por la propagación de enfermedades o plagas, no pueden aprovechar gran parte de la

energía solar que reciben. Por lo tanto, si la fotosíntesis no se produce en las condiciones adecuadas, las plantas utilizan la fluorescencia de la clorofila como una forma de disipar de forma total o parcial la energía solar.

Desde el punto de vista de la agricultura de precisión, la información específica del lugar de cultivo sobre el progreso de la fotosíntesis puede ser de gran interés a la hora de optimizar la dosificación de agua y de los fitoquímicos. Por ejemplo, la detección de fluorescencia actualmente es posible utilizando el sensor de proximidad Multiplex desarrollado por Force-A (París, Francia). Al utilizar la fluorescencia de la planta, este sensor proporciona información sobre el estado fisiológico del cultivo y sobre el contenido de clorofila y polifenoles de las hojas y frutos. De esta manera, a través de mediciones discretas o continuas, los agricultores pueden disponer de información adicional para tomar decisiones en áreas tales como fertilización, detección precoz de enfermedades o monitoreo de los parámetros de calidad del cultivo. Más aún, la Agencia Espacial Europea está preparando una misión para el 2022 llamada Earth Explorer - Fluorescence Explorer (FLEX) que permitirá mapear la fluorescencia de la vegetación y, por tanto, cuantificar la actividad fotosintética. Actualmente, tales datos sólo se pueden obtener con sensores de proximidad (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/flex>). ■

Glosario de términos

Monitoreo por sensores remotos: Técnicamente, el monitoreo por sensores remotos consiste en adquirir información sobre objetos o fenómenos sin contacto físico. En la Agricultura de Precisión, se refiere generalmente al uso de tecnologías de monitoreo por sensores utilizando satélites, aeronaves y vehículos aéreos no tripulados para detectar, analizar y clasificar la vegetación basándose en la radiación electromagnética emitida y/o reflejada de fuentes de energía pasiva o activa. El monitoreo por sensores remotos se utiliza en numerosas áreas como la agricultura, la geografía, la hidrología topográfica, la ecología, la oceanografía, y la geología, entre otros.

Misiones Centinela: La Agencia Espacial Europea (ESA) está desplegando una nueva familia de misiones de observación y monitoreo de la Tierra denominada Centinelas dentro del programa Copérnico. Cada misión Centinela está basada en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de revisión y cobertura, proporcionando datos contundentes para Copernicus Services (Servicios Copérnico). Estas misiones utilizan una gama de tecnologías, como el radar y los instrumentos multispectrales de imágenes para el monitoreo terrestre, oceánico y atmosférico. Una de estas misiones es Sentinel-2, que es una misión multispectral de imágenes de alta resolución (10 o 20 m) para el monitoreo terrestre que proporciona, por ejemplo, imágenes de

la vegetación, del suelo y de la cubierta de agua, las vías navegables interiores y las zonas costeras.

Monitoreo por sensores de proximidad: Término utilizado como opuesto al monitoreo por sensores remotos. ¿Pero qué tan próximo es el monitoreo por sensores de proximidad? En Agricultura de Precisión se acepta normalmente que las técnicas de monitoreo por sensores de proximidad son aquellas que utilizan sensores terrestres. Los sensores de proximidad son muy útiles para obtener datos de cultivo con un mayor grado de detalle que con los sensores remotos, o para obtener datos de áreas ocultas, imposibles de monitorear usando sensores remotos.

Monitoreo por sensores de medición continua: Es la técnica de monitoreo compuesta por uno o varios sensores que proporcionan lecturas de forma casi continua, de manera que las mediciones pueden ser adquiridas para su almacenamiento y posterior procesamiento o para ser procesadas en tiempo real. Una vez conectados, algunos sensores están diseñados para proporcionar lecturas a una determinada frecuencia de modo que el sistema de recopilación sólo necesite capturar los datos. Otros sensores están diseñados para responder después de una señal de accionamiento. Dicha señal debe ser entregada por el sistema de captación, lo que lo obliga a tener un microprocesador.